

Entre o verde e o cinza: descarbonização do cimento Portland e durabilidade do concreto – uma revisão crítica.

E. Possan^{1*} 

* Autor de Contato: epossan@email.com; edna.possan@unila.edu.br

DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.978>

Recebido: 30/10/2025 | Correções recebidas: 17/11/2025 | Aceito: 08/12/2025 | Publicado: 01/01/2026

RESUMO

Este artigo apresenta uma revisão crítica sobre a descarbonização do cimento Portland (CP) e suas implicações para a durabilidade do concreto. A redução do teor de clínquer, estratégia central para mitigar as emissões de CO₂, tem sido acompanhada por alterações físico-químicas que elevam a reatividade do CP, aumentando o calor de hidratação e o risco de reações expansivas. Ademais, a menor reserva alcalina acelera a carbonatação, elevando o risco de corrosão das armaduras. Estas e outras questões devem ser consideradas no processo de descarbonização, sendo necessários estudos sistêmicos que abordem as compensações entre a redução de CO₂ e a durabilidade ao longo do ciclo de vida das estruturas de concreto.

Palavras-chave: cimentos menos emissivos; desempenho de durabilidade, vida útil, mudanças climáticas.

Citar como: Possan, E. (2026), "Entre o verde e o cinza: descarbonização do cimento Portland e durabilidade do concreto – uma revisão crítica.", Revista ALCONPAT, 16 (1), pp. 41 – 58, DOI: <https://doi.org/10.21041/ra.v16i1.978>

¹ Programa de pós-graduação em Engenharia Civil (PPGECI), Universidade Federal da Integração Latino-Americana (Unila), Foz do Iguaçu, Brasil.

Contribuição de cada autor

A autora Edna Possan atuou em todos os desenvolvimentos deste paper.

Licença Creative Commons

Copyright (2026) é propriedade dos autores. Este trabalho é um artigo de acesso aberto publicado sob os termos e condições de uma Licença Internacional Creative Commons Atribuição 4.0 ([CC BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)).

Discussões e correções pós-publicação

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2026, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2026.

Between green and gray: decarbonization of Portland cement and durability of concrete – a critical review.

ABSTRACT

This paper presents a critical review of the decarbonization of Portland cement (PC) and its implications for concrete durability. The reduction of clinker content, a central strategy to mitigate CO₂ emissions, has been accompanied by physicochemical adjustments that increase PC reactivity, leading to higher heat of hydration and a greater risk of expansive reactions. Moreover, the lower alkaline reserve of low-carbon cement accelerates carbonation, increasing the probability of steel reinforcement corrosion. These and other issues must be considered in the decarbonization process, highlighting the need for systemic studies that address the trade-offs between CO₂ reduction and long-term durability over the service life of concrete structures.

Keywords: low-emission cements, durability performance, service life, climate change.

Entre el verde y el gris: descarbonización del cemento Portland y la durabilidad del hormigón – una revisión crítica.

RESUMEN

Este artículo presenta una revisión crítica de la descarbonización del cemento Portland (CP) y sus implicaciones para la durabilidad del hormigón. La reducción del contenido de clínker, estrategia central para mitigar las emisiones de CO₂, ha sido acompañada de ajustes fisicoquímicos que aumentan la reactividad del CP, elevando el calor de hidratación y el riesgo de reacciones expansivas. Además, la menor reserva alcalina de los cementos de menor emisión acelera la carbonatación, lo que aumenta la probabilidad de corrosión de las armaduras. Estas y otras cuestiones deben considerarse en el proceso de descarbonización, lo que evidencia la necesidad de estudios sistémicos que aborden las compensaciones entre la reducción de CO₂ y la durabilidad a lo largo de la vida útil de las estructuras de hormigón.

Palabras clave: cementos de baja emisividad; durabilidad; vida útil; cambio climático.

Informações legais

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel. +52 1 983 419 8241, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

A reprodução total ou parcial do conteúdo e das imagens da publicação é realizada de acordo com o código COPE e a licença CC BY 4.0 da Revista ALCONPAT.

1. INTRODUÇÃO

A industrialização iniciada no século XVIII trouxe inúmeros avanços para a humanidade, incluindo o desenvolvimento do cimento Portland, que se tornou, desde então, um dos principais materiais de construção. No entanto, esse processo também desencadeou impactos ambientais significativos e de longa duração. As concentrações de carbono atmosférico aumentaram exponencialmente, passando de 280 ppm em 1800 para 428 ppm em 2025 (NOAA, 2025), o que tem causado alterações climáticas importantes e indesejáveis, como o aquecimento global, fenômeno diretamente associado à concentração atmosférica deste gás. Paralelamente, de 1800 a 2025 aumentou-se a população global de aproximadamente 1 para 8,1 bilhões (Population Matters, 2025) e estima-se que em 2050 a Terra terá 9,8 bilhões de habitantes (United Nations, 2017), com demandas crescentes de alimentos a materiais de construção, itens essenciais à sobrevivência humana.

Essa expansão demográfica intensifica a pressão sobre os recursos naturais, especialmente quanto à ampliação e adequação do ambiente construído. O ambiente construído é formado pelo lugar de morar (casas, apartamentos), pela infraestrutura de suporte e de lazer (hospitais, creches, escolas, parques, shoppings, clubes, etc.), de produção (indústrias, lojas, centros de distribuição) e de mobilidade (estradas, aeroportos, portos, vias navegáveis, etc.), entre outros. Logo, a efetiva demanda por recursos materiais tende a crescer de forma intensiva, conforme a população aumenta, o que, nos moldes atuais de produção e consumo (*business as usual*), está diretamente associado ao consumo de energia e às emissões de carbono.

Entre os materiais críticos nesse processo destaca-se o cimento Portland (CP), principal componente reativo do concreto, um dos materiais mais consumidos do mundo, com média global de 563 kg por habitante ano (Kumar, 2020), com perspectiva de aumento devido ao crescimento populacional e às demandas por infraestrutura urbana e habitacional. A problemática ambiental do cimento Portland advém do elevado consumo do produto, que, por sua vez, apresenta elevadas emissões de CO₂ associadas à produção (Habert et al., 2020; Olivier & Paters, 2020; Kissman et al., 2020). Para a fabricação de uma tonelada de clínquer são emitidos de 850 a 1000 kg de CO₂ (Habert & Roussel, 2009; Possan, 2019), com 60-65% de carbono de origem química, advindo da descarbonatação da rocha calcária durante o processo de clinquerização e 30-40% decorrente do uso de combustíveis fósseis (Adesina, 2020; Possan, 2019; ROADMAP BRASIL, 2019a). Esses indicadores associados ao elevado consumo de CP, tornam a indústria cimenteira responsável por 5-8% do CO₂ emitido globalmente (Hansen et al., 2023; IPPC, 1992), destacando-a no combate às mudanças climáticas. E para alcançar as emissões líquidas zero em 2050, conforme pleiteado pelo Acordo de Paris (United Nations, 2015), faz-se necessária a implementação gradativa de um conjunto de ações. Estas são associadas tanto ao processo de produção do CP, como eficiência energética, uso de combustíveis renováveis e captura de carbono, quanto ao material em si, como o aumento da reatividade do clínquer por meio de processos físico-químicos, que possibilitam a redução do teor de clínquer contido no cimento e o emprego de maiores teores de materiais cimentícios suplementares (MCS) e fílers.

Neste sentido, diferentes Roadmaps foram publicados pelas indústrias e associações do setor cimenteiro global (IEA/CSI, 2009; ROADMAP BRASIL, 2019a; WBCSD, 2018b), apresentando os planos de ações necessários ao longo dos anos para descarbonizar o cimento Portland. As primeiras ações implementadas ou em estágio de implementação concentram-se principalmente na redução de emissões, centrando-se no nível de eficiência energética, na mudança de combustíveis e na redução do teor de clínquer no cimento, que apresentam menor custo de implementação. Ações mais significativas estão no escopo de remoção de carbono e estão previstas para implementação a partir de 2030, incluindo as tecnologias de CCUS (*Carbon Capture, Utilization and Storage*), que ainda estão em fase de desenvolvimento e demandam custos elevados de instalação. As técnicas de CCUS são consideradas primordiais para a descarbonização global (Coffetti et al., 2022;

Emanuelsson et al., 2025; S. Kumar et al., 2025; Nehdi et al., 2024), tornando-se soluções de interesse no mercado de carbono, em vigência em pouco mais de 20 países no mundo, principalmente na União Europeia (Dolphin and Merkle, 2025), e recém-implementadas no Brasil pela Lei 15.042, de dezembro de 2024 (Brasil, 2024).

Em relação às ações em curso voltadas à descarbonização do CP, este artigo abordará apenas os aspectos da estratégia de diminuição do teor de clínquer contido no cimento Portland para promoção da redução das emissões de CO₂ do setor cimenteiro, avaliando os efeitos na durabilidade das estruturas de concretos produzidas com cimentos menos emissivos. Para implementação desta estratégia, Habert et al. (2020), Kumar et al. (2025) e Juenger et al. (2019) destacam que são atualmente empregados materiais cimentícios suplementares (MCS) reativos ou inertes em substituição ao clínquer, maiormente cinzas volantes, escórias de alto-forno, argilas calcinadas e fíler calcário.

Os dois primeiros produtos são materiais residuais reativos oriundos de termoelétricas e siderúrgicas, respectivamente, e são considerados neutros em carbono. Segundo Scrivener et al. (2018), estes materiais são gerados em volume insuficiente para atender à escala de produção com disponibilidade restrita à cadeia geradora. A solução de emprego de argilas calcinadas e de fíler tem ganhado destaque pela disponibilidade de matéria-prima, e apesar da demanda de processos de calcinação (argila) e moagem (fíler e argila), possui emissões de CO₂ inferiores às do clínquer Portland, constituindo-se uma alternativa potencial para a descarbonização do setor cimenteiro.

Os fílers têm-se destacado neste cenário por dependerem apenas do processo de extração e de moagem, sendo menos emissivos e mais baratos que o CP (Scrivener, et al., 2018). Por serem materiais inertes, aplicações em matrizes não empacotadas e sem aditivos, os fílers não contribuem para as reações químicas do CP e para o aumento da resistência mecânica dos materiais à base de cimento ao longo do tempo (Oliveira et al., 2023). Logo, sem a associação de empacotamento de partículas e emprego de ativos dispersantes, a incorporação de maiores teores de fílers, assim como de maiores teores de MCS, pode exigir da indústria a promoção de alterações físico-químicas para elevar a reatividade tanto do clínquer quanto do cimento Portland.

O aumento da reatividade do cimento, mesmo após a diluição pelo uso de MCS em substituição ao clínquer, tem implicações no aumento do calor de hidratação, o que eleva os riscos de manifestações patológicas, especialmente fissurações de origem térmica, que já aparecem nas primeiras idades, além de favorecer a DEF (*Delayed Ettringite Formation*) verificada em idades mais avançadas sob algumas condições específicas.

Logo, avaliar como a descarbonização do CP pode impactar a durabilidade das estruturas de concreto constitui um tema de pesquisa a ser explorado, já que há poucos estudos sistêmicos na literatura sobre o tema. Sendo assim, este paper apresenta uma revisão crítica baseada em estudos recentes e iniciativas setoriais, com foco nas principais rotas de descarbonização da indústria cimenteira, especialmente o aspecto da redução do fator de clínquer por meio do uso de materiais cimentícios suplementares (MCS). O artigo analisa o processo atual de descarbonização do cimento Portland (CP) e questiona as possíveis implicações para a durabilidade de estruturas de concreto.

2. DESENVOLVIMENTO E EMISSÕES DE CARBONO

O *Homo sapiens*, ao longo de milhões de anos, descobriu, aprimorou e aplicou diferentes tecnologias que o levaram ao estágio atual de desenvolvimento. Pode-se indicar que a humanidade desenvolveu um conjunto de tecnologias em escala mundial que provocaram grandes transformações sociais, culturais e ambientais. Neste percurso, observa-se uma trajetória que vai do desenvolvimento da linguagem há 6 milhões de anos até a engenharia genética e a inteligência artificial regenerativa dos tempos atuais (figura 1). Neste ínterim, foram desenvolvidas ferramentas de pedra, o domínio do fogo, a agricultura, a escrita, a presa móvel [prelo], o motor a combustão, a internet, entre outras tecnologias.

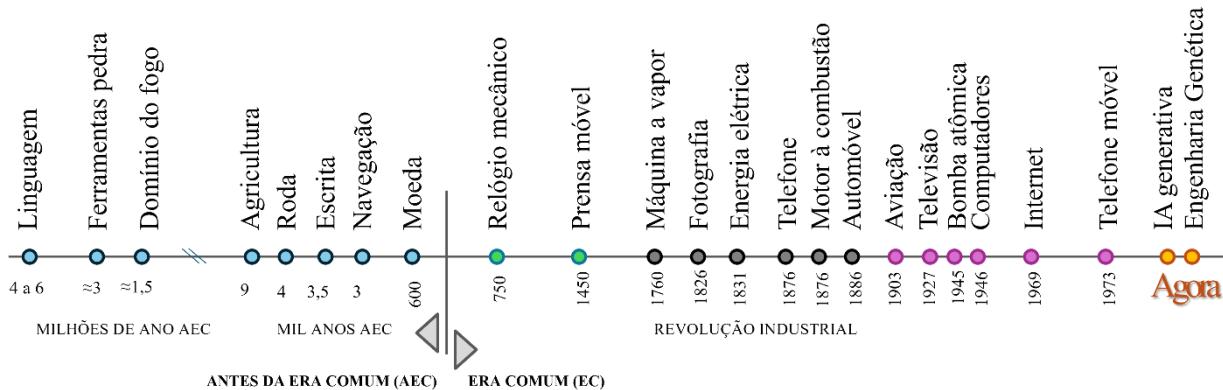


Figura 1. Tecnologias de ordem mundial que mudaram o mundo (construído a partir da leitura das obras de Harari, 2020, 2024; Suleyman & Bhaskar, 2023).

Após a Revolução Industrial, é onde se concentra o maior número de descobertas transformadoras, maiormente associadas à maior disponibilidade energética que permitiu o amplo desenvolvimento tecnológico. Porém, esse amplo desenvolvimento, baseado em um sistema energético movido a combustíveis fósseis, sobretudo carvão e petróleo, e a extração de recursos naturais não renováveis para atender a uma demanda por consumo para além da subsistência humana, conduziram à elevação exponencial das emissões de carbono e ao crescimento populacional (Figura 2).

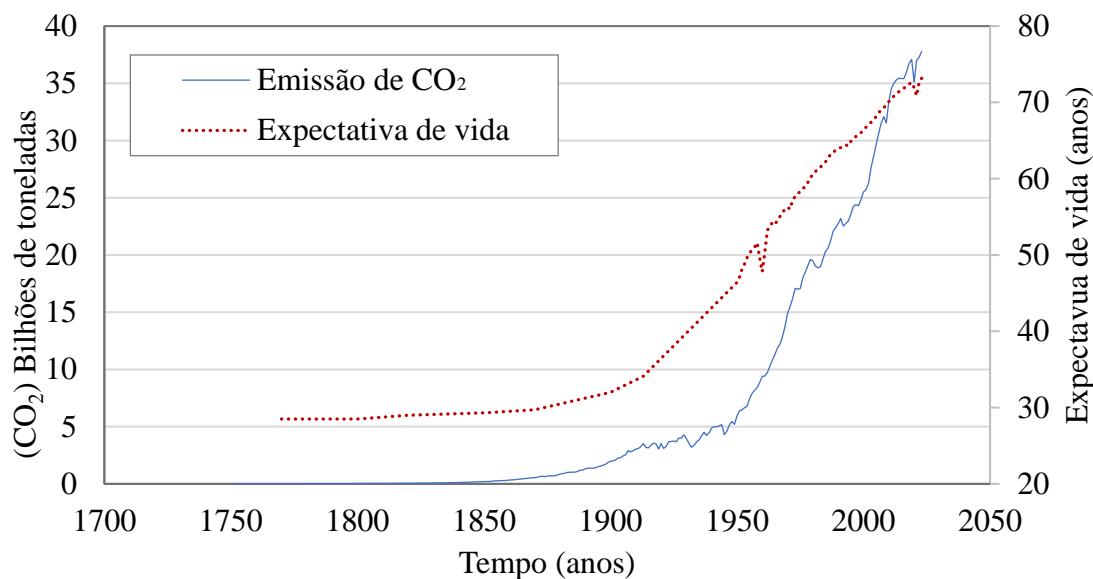


Figura 2. Emissões globais de CO₂ (Ritchie & Roser, 2025) e expectativa de vida (Dattani et al., 2025) da revolução industrial à atualidade.

O aquecimento global tem sido associado por cientistas do mundo todo ao aumento da concentração de CO₂ na atmosfera. Embora o aquecimento global seja um ciclo natural, a era atual testemunha uma aceleração única e alarmante, com recordes que superam os de épocas anteriores. Em menos de 200 anos, as atividades humanas aumentaram em 50% o teor de CO₂ na atmosfera (NASA, 2025). Atualmente, a concentração atmosférica média global de CO₂ tem o maior valor registrado em milhões de anos (NASA, 2025). E sob a atual abordagem geopolítica global para as emissões de GEE, aquecimento global excederá 1,5 °C na década de 2020 e 2 °C antes de 2050 (Hansen et al., 2023).

Por outro lado, esses desenvolvimentos contribuíram para a elevação da expectativa de vida, que entre 1770 e 1870 era de 29 anos, passando para aproximadamente 50 e 73 em 1950 e 2023, respectivamente (Dattani et al., 2025). O aumento da expectativa de vida é associado às melhorias

das condições de vida, com disponibilidade de alimentos, aquecimento, remédios, vacinas, entre outros (OECD, 2024). Segundo o historiador Harari (2020) a engenharia genética ainda neste século poderá aumentar de forma significativa a longevidade humana, especialmente para os que tiverem acesso à saúde preventiva.

Porém, esses longevos precisarão de um planeta vivo! Os cenários atuais não são otimistas.

Em relação à era pré-industrial, com o aquecimento global tem-se menos dias de ar livre (Choi et al., 2024), consta-se o derretimento das calotas polares e a elevação no nível do mar (Koutoulis, 2019), o aumento da intensidade das chuvas e de eventos extremos, como o que acometeu a cidade de Porto Alegre, no Brasil, em 2024, entre outros fatores associados às mudanças climáticas. Em 2024 excedeu-se a meta otimista do IPCC de elevação de 1,5 °C da temperatura do planeta até 2030 em relação à era pré-industrial em relação à era pré-industrial (NOAA/ESRL, 2025). Em 2025, tem-se a retirada dos EUA do Acordo de Paris (acordo global para mitigar os efeitos do aquecimento global), um dos países mais poluidores do planeta. Ainda, o mundo parece estar na iminência de novos conflitos armados, ações que atrasam o processo de contenção do carbono de que a humanidade precisa promover com urgência. Esse é o cenário de 2025.

O crescimento populacional e as tendências globais de desenvolvimento deverão intensificar a demanda por cimento, ampliando as emissões de CO₂ de um setor que já figura entre os mais difíceis de descarbonizar (Olsson et al., 2023; Shah et al., 2022). A questão central atual é como continuar o desenvolvimento da humanidade fazendo em paralelo a contenção de carbono necessária para frear/minimizar o aquecimento global a fim de permitir a continuidade da vida como a conhecemos hoje no planeta Terra. Os otimistas tecnicistas acreditam que será desenvolvida alguma tecnologia que nos salvará! Enquanto isso ainda é só uma utopia, resta à humanidade torcer por um ajuizamento coletivo em prol da Terra.

Neste contexto, a indústria da construção será, portanto, chamada a responder a duas necessidades humanas aparentemente incompatíveis: preservar o meio ambiente e apoiar o crescimento populacional, fornecendo habitação e infraestruturas e promovendo reconstruções em regiões de conflito. O cimento Portland por ser um dos materiais de construções mais usados, possui especial importância no processo de descarbonização, sendo objeto de discussão neste paper.

3. CIMENTO, CONCRETO E DURABILIDADE

O cimento e o concreto são marcos do desenvolvimento contemporâneo. Destacam-se pela potencialidade de aplicações na produção de materiais cimentícios como pastas, argamassas e concretos, que podem ser produzidos em qualquer lugar pela simples adição de água e/ou agregados (Mehta & Monteiro, 2014), podendo conter aditivos e outros componentes quando for necessária a produção de concretos especiais. Na produção do concreto convencional, o CP geralmente é empregado em menores quantidades do que os agregados ($\approx 15\%$), contudo, conforme apresentado na figura 3, representa até 90% das emissões totais de CO₂.

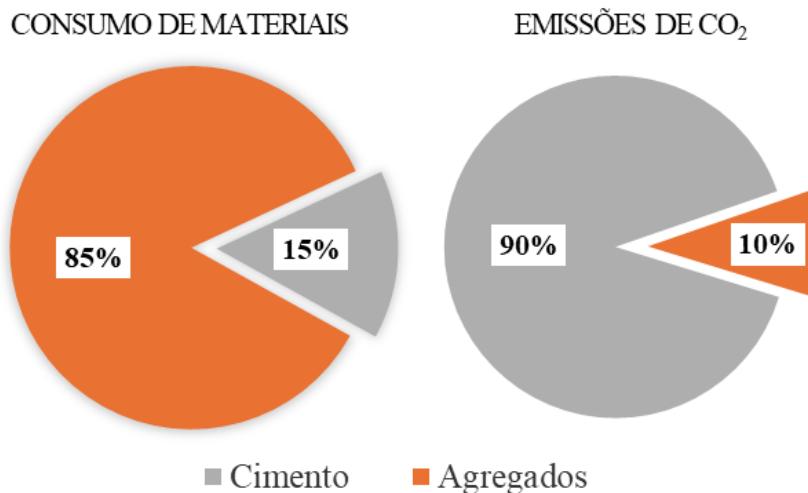


Figura 3. Consumo de agregados e CP e emissões de CO₂ do cimento e dos agregados para a produção de um m³ de concreto convencional (fck 20 – 50 MPa) compilado de Goulart (2023).

Entende-se que é mais complexo promover a descarbonização na cadeia do concreto do que na indústria cimenteira. No Brasil, há uma centena de fábricas de cimento no território, número significativamente inferior ao de centrais dosadoras de concreto, presentes na maior parte dos municípios brasileiros, com várias unidades em cidades de maior porte; esse número torna o processo mais complexo. Uma vez que a maior parcela das emissões de CO₂ da cadeia de produtos e serviços de materiais à base de cimento advém do cimento Portland (figura 4), as estratégias de descarbonização da cadeia do concreto são voltadas à otimização de processos, ao correto proporcionamento dos materiais, ao emprego de novos métodos de dosagem e de agregados menos emissivos. Considerando a dimensão setorial, a impressão é de que os passos nessa direção ainda são lentos.

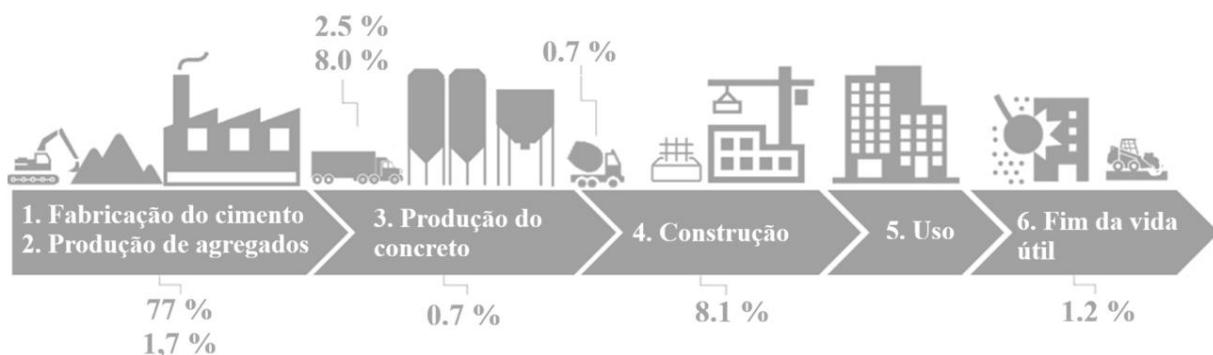


Figura 4. Emissões de CO₂ no ciclo de vida do cimento e do concreto (Climateworks, 2025).

De outro lado, o setor cimenteiro, há anos, tem implementado estratégias de descarbonização, sobretudo as que têm alto potencial competitivo para reduzir custos de produção, por meio da redução do teor de clínquer no cimento. Nos principais Roadmaps do setor cimenteiro nacional (ROADMAP BRASIL, 2019) e internacional (WBCSD, 2018), como estratégias de descarbonização do cimento, destacam-se soluções como a redução do teor de clínquer no cimento, decorrente da substituição do clínquer por materiais menos emissivos; a maior eficiência energética nos processos produtivos; e a substituição de combustíveis nos fornos. A literatura aponta que a substituição do clínquer por MSC pode reduzir até 1,3 gigatoneladas de CO_{2eq} em 2018 (Shah et al., 2022). Na figura 5, pode-se observar como está a implementação desta estratégia no Brasil. Observa-se que, desde o final do século passado, tem-se uma queda no teor de clínquer contido no CP, o que impacta diretamente a redução das emissões de CO₂ do material. Atualmente, a relação

clínquer-cimento é de cerca de 0,62, com previsão de atingir 0,52 em 2050, o que permitiria produzir cimentos com menos de 375 kg.CO₂ por tonelada (ROADMAP BRASIL, 2019). A literatura cita que o aumento da finura e/ou aumento no teor de C₃S e C₃A do cimento são estratégias que podem ser empregadas para elevar a reatividade do CP (Bentz; Sant; Weiss, 2008).

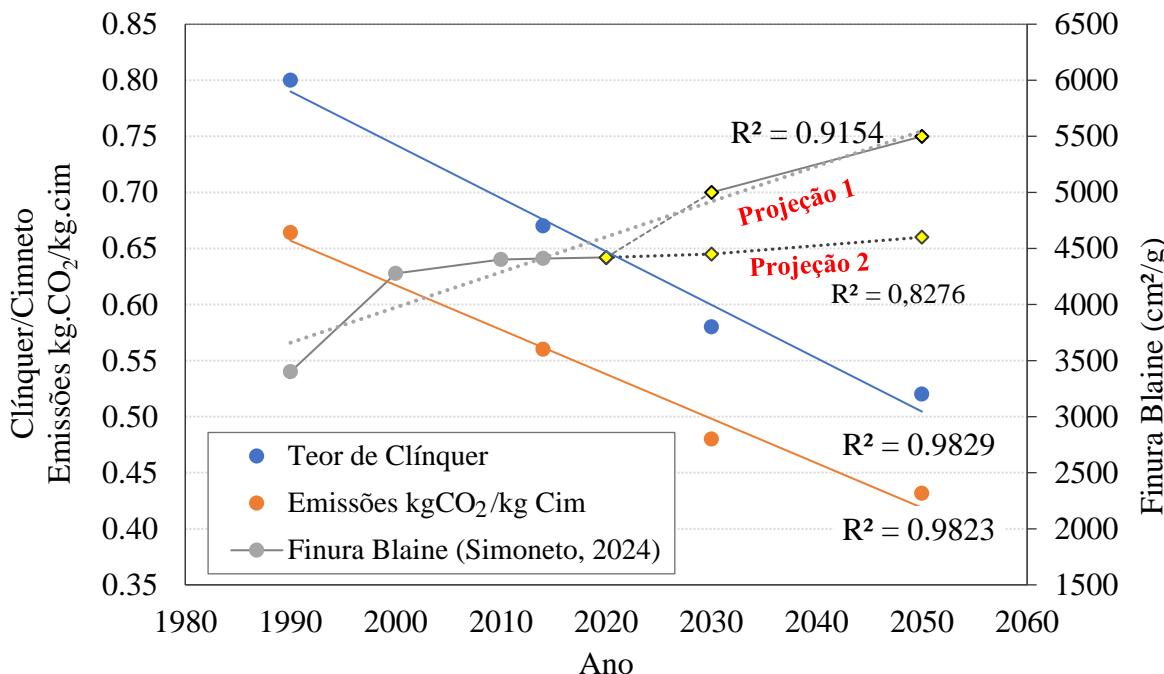


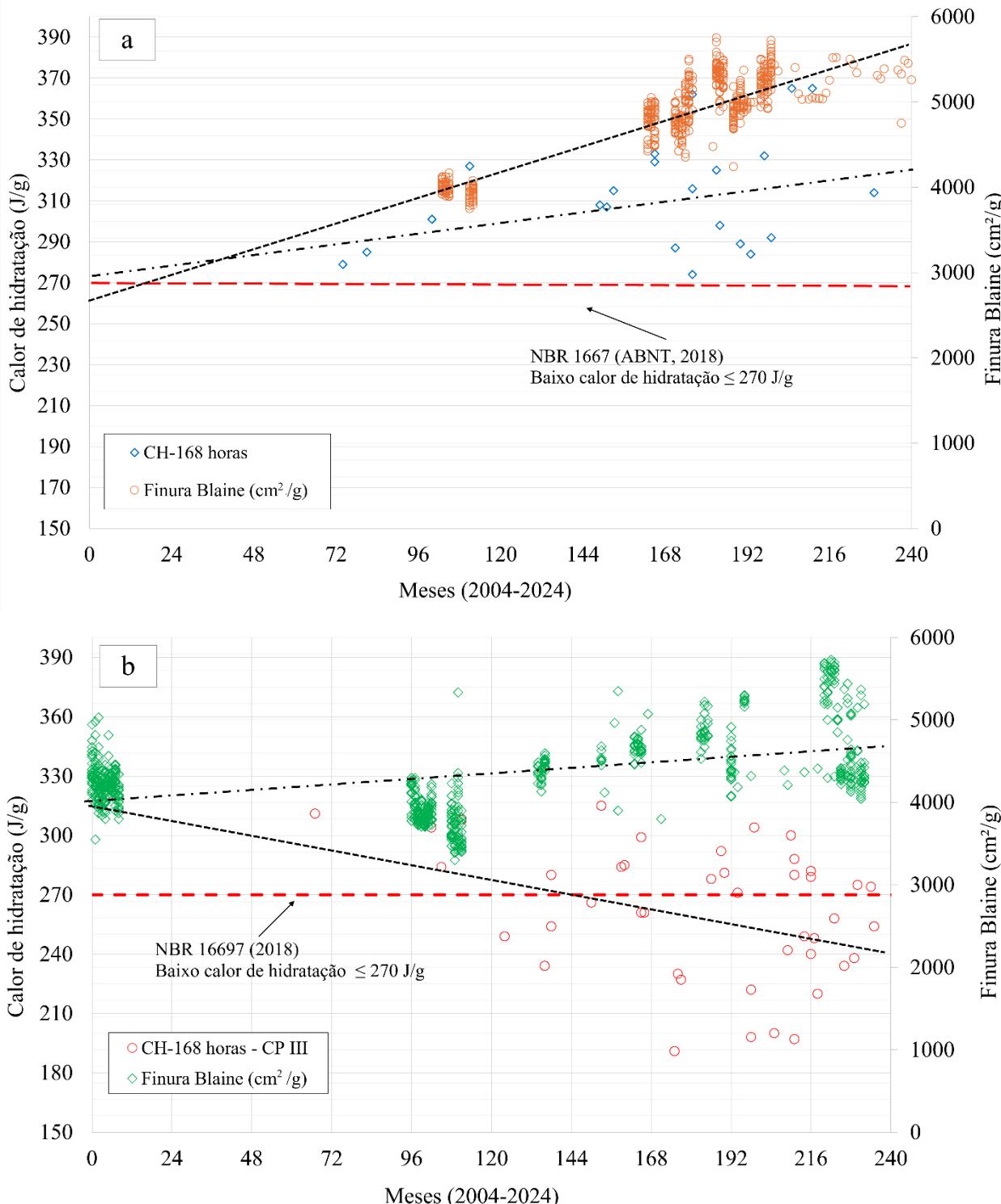
Figura 5. Redução o teor de clínquer contido no cimento Roadmap Brasil (2019) e alteração da finura Blaine ao longo dos anos (Simoneto, 2024).

Para entender como esse processo de substituição é possível, mantendo-se a resistência à compressão do cimento aos 28 dias, Simoneto (2024) desenvolveu um estudo estatístico com base em resultados secundários de trabalhos publicados nos últimos 30 anos que empregaram diferentes CP brasileiros. O autor constatou que, em paralelo à redução do fator clínquer, observa-se um aumento da finura Blaine do cimento (figura 5, linha cinza). Em 1990, a finura do CP brasileiro era da ordem de 3400 cm²/g e o teor de clínquer era de 0,79. Em 2020, a finura média é da ordem de 4420 cm²/g e o teor de clínquer é de 0,65. Com base na projeção dos dados para um R² de 0,91, a finura média do CP poderá chegar próximo a 5500 cm²/g em 2050 para um teor de clínquer de 0,52. De fato, Simoneto (2024) constatou que alguns cimentos brasileiros já apresentam índices de finura próximos ao patamar de 2050, em especial o CP V ARI (Cimento Portland de Alta Resistência Inicial) e o CP II-F 40 (cimento Portland composto com fílers, classe de 40 MPa). Essas alterações se intensificam a partir de 2018, com a mudança das normas de cimento que foram substituídas pela NBR 16697 (ABNT, 2018), a qual permite maiores teores de substituição de clínquer por fílers e MCS.

A maior superfície específica das partículas do cimento advém da maior moagem do clínquer, do emprego de fílers ou de materiais cimentícios suplementares de elevada figura e/ou da combinação de ambos. Contudo, no estudo de Simoneto (2024), devido ao método empregado de levantamento de dados secundários, não foi possível identificar a origem desta finura. Há anos já é sabido que cimento com elevada área superficial demanda maior consumo de água e gera maior quantidade de calor durante o processo de hidratação (Mehta & Monteiro, 2014), demandando cuidados especiais tanto na produção quanto nos lançamentos de grandes volumes, em peças pouco esbeltas, como blocos, sobretudo para evitar problemas associados à demanda de água e à liberação de calor.

Em outro estudo, Funahashi et al. (2024) compilaram aproximadamente 1700 resultados primários (análises físico-químicas e ensaios de calor de hidratação pelo método da garrafa de Langavant até

168 horas) para os cimentos brasileiros CP II-E e CP III (ABNT, 2018) produzidos nas últimas duas décadas (2004 até 2024) por cinco diferentes fabricantes (A, B, C, D e E). Os autores também constataram o aumento na finura Blaine ao longo dos anos (figura 6) corroborando os resultados de Simoneto (2024). Para o CP II-E, constata-se uma elevação do calor de hidratação com o avanço do tempo, enquanto no CP III, apesar da dispersão de resultados, há uma tendência de redução.



Para o cimento CP III, apesar do aumento da finura Blaine, constatou-se a redução na geração de calor ao longo dos últimos anos, o que pode estar associado à elevação do teor de escória de alto-forno empregado como MSC (Funahashi Jr. et al., 2024). Além do aumento do calor de hidratação, constatou-se um aumento do teor de SO₃, especialmente no cimento Portland composto com escória (CP II-E). Com base em valores médios dos dados de ensaio antes da alteração da norma de cimento em 2018, Funahashi et al (2024) verificou-se um aumento de 21% e 28% no teor de SO₃ para os cimentos CP II-E e CP III, respectivamente. Também se constatou uma redução dos teores de MgO e de álcalis no cimento CP II-E e uma tendência de elevação dos teores de MgO e Al₂O₃ para o cimento CP III. Os resultados de Funahashi et al. (2024) e Simoneto (2024), desenvolvidos com diferentes estratégias de pesquisa e com diferentes bancos de dados, indicam que os cimentos Portland brasileiros estão sofrendo alterações físico-químicas importantes nos últimos anos, cabendo ao projetista conhecê-las e inserir soluções de projeto e especificações do concreto que minimizem os efeitos dessas alterações. Um dos efeitos é a DEF, e para evitar essa ocorrência, a literatura recomenda não ultrapassar temperaturas de 60 e/ou 65 °C (Haspryk et al., 2023). Além da finura, a composição química do cimento desempenha papel importante no desenvolvimento de reações expansivas. Cimentos com teores de aluminato tricálcico (C₃A) associados ao SO₃ mais elevados, trazem maiores riscos de ataques por sulfatos e de desenvolvimento e DEF (Funahashi Jr et al., 2024; Haspryk et al., 2023). Os autores destacam, com base na composição química do cimento como medida preventiva visando à durabilidade, que as relações SO₃/Al₂O₃ e (SO₃)₂/Al₂O₃ devem ser inferiores a 0,50 e 2,0, respectivamente.

Além destas questões supracitadas, a redução do teor de clínquer reduz a reserva alcalina do cimento, permitindo maiores velocidades de difusão de CO₂ para o interior do concreto, podendo ser prejudicial para elementos de concreto armado sujeitos à ação de CO₂ e presença de umidade, face ao risco de corrosão pela despassivação da armadura pelo processo de carbonatação (Possan, 2010; Possan et al., 2018). Alexander & Beushausen (2019) relatam que, na literatura, observa-se a ampliação do interesse pela modelagem da carbonatação, particularmente relacionada ao crescente uso de materiais cimentícios suplementares (MCS). Atentam que os modelos desenvolvidos devem considerar a química (material carbonatável) e a reatividade do MCS, considerando a relação entre a resistência física e química à penetração de CO₂ para o interior do concreto, aplicando-se o mesmo para cloretos (Alexander & Beushausen, 2019).

Em relação à variação do teor de MCS, Simoneto (2024) realizou um estudo *in situ* para avaliar os aspectos associados aos concretos convencionais produzidos em obra empregando cimentos com diferentes teores de clínquer. Os concretos foram produzidos pelos operários, 5 bateladas por cimento, sem interferência do pesquisador. Os resultados encontrados (tabela 1) indicam que o cimento com maior teor de clínquer (CP V ARI) apresentou melhores indicadores de ecoeficiência e de durabilidade do que o cimento menos carbonizado (CP II-Z). Para a estimativa da VUP (vida útil de projeto que corresponde ao período de iniciação da corrosão) para simulação da difusão de cloretos e de CO₂ (carbonatação) foram empregados os modelos de Andrade et al. (2017) e de (Possan et al., 2018), respectivamente, considerando o concreto aparente (sem revestimento). Nas simulações, o ambiente de exposição considerado foi externo, protegido da chuva, com concentração de CO₂ de 422 ppm e umidade relativa de 73% e temperatura de 25°C. O Ivup (índice de vida útil de projeto), em kg.cimento/ano, foi calculado considerando o consumo de cimento para produção de um m³ de concreto dividido pela VUP simulada com base na resistência à compressão do concreto aos 28 dias (equação 1). Quanto menor este indicador, melhor.

$$I_{VUP} = \frac{kg.cimento/m^3}{VUP} \quad (1)$$

Os índices de ligante (IL) e de Carbono (IC) foram calculados conforme a literatura (Damineli et al., 2010; Oliveira et al., 2023), considerando-se também que menor é melhor.

Conforme Tabela 1, nas condições de produção destes concretos, produzidos em obra, sem orientação técnica e controle de materiais e processos, tem-se indicadores técnico, ambientais e de sustentabilidade menos favoráveis para o cimento menos carbonizado, indicando que para que o processo de descarbonização seja realmente efetivo, há de se trabalhar com toda a cadeia do material para que não se tenha perda de desempenho na aplicação. Do contrário, pode-se estar apenas mudando o carbono de lugar: do cimento para o concreto. Neste sentido, Adesina e Zhang (2024) destacam que apenas reduzir o carbono incorporado dos materiais constituintes é insuficiente para garantir um concreto efetivamente sustentável, precisando também ser analisadas as implicações do emprego de materiais de baixo carbono que substituem os constituintes convencionais na mistura. Os autores dizem que é necessário utilizar materiais de menor impacto ambiental, além de produzir concreto mais durável para garantir desempenho a longo prazo (Adesina & Zhang, 2024). No caso analisado (tabela 1), os indicadores IL, IC e Ivup foram ligeiramente menores, o que é desejável, para os concretos produzidos com cimento CP V ARI, que possui maior pegada de carbono por tonelada quando comprado ao cimento CP II Z (Possan, 2019). Isso deve-se ao fato de, na aplicação, concretos produzidos com CP V ARI apresentarem resultados de resistência à compressão 22% superiores, o que impacta diretamente os indicadores ambientais e de durabilidade em avaliação.

Tabela 1. Indicadores técnicos-ambientais e de durabilidade de concretos convencionais produzidos em obra, empregando diferentes tipos de cimento, extraídos do estudo de Simoneto (2024).

| Indicadores | Cimento Portland (ABNT, 2018) | |
|--|-------------------------------|------------|
| | CP V ARI | CP II Z 32 |
| Fc (MPa) | 25,0 | 19,3 |
| Consumo de Cimento (kg/m ³) | 305,0 | 298,0 |
| IL (kg.Cimento/MPa) | 12,4 | 13,4 |
| IC (kg.CO ₂ /MPa) | 11,1 | 12,5 |
| Difusão de CO ₂ (Possan, et al., 2018) | Ec (mm) | 17,7 |
| | VUP (anos)* | 99,5 |
| | Ivup (kg.Cimento/ano) | 3,1 |
| Difusão de Cl (Andrade et al., 2017) | Cl (mm) | 60,58 |
| | VUP (anos)** | 21,5 |
| | Ivup (kg.Cimento/ano) | 14,2 |

Cobrimento adotado nas simulações: * 25 mm **40 mm. Fc = resistência à compressão do concreto aos 28 dias. IL=índice de ligante. IC=índice de carbono. Ec = profundidade de carbonatação para 50 anos de VUP. Cl = penetração de cloretos para 50 anos de VUP. VUP = vida útil de projeto. Ivup = Índice de vida útil.

A resistência à compressão é um indicador crítico da capacidade do concreto suportar danos ambientais (Félix et al., 2023). Como essa propriedade é associada à porosidade — quanto menor a resistência, maior a porosidade —, consequentemente, será mais facilitado o ingresso de agentes agressivos e menor a VUP, o que é indesejável do ponto de vista da durabilidade e sustentabilidade das construções.

Sabe-se que a durabilidade dos materiais à base de cimento não é uma propriedade intrínseca a qual depende da interação com ambiente de exposição (Scrivener, et al, 2018). O projeto de durabilidade envolve a seleção de uma combinação adequada de materiais e detalhes estruturais para garantir a durabilidade (funcionamento) da estrutura (Alexander & Beushausen, 2019). Estudos de durabilidade são necessários para análise de vida útil das estruturas de concreto, a qual apresenta caráter holístico (Castro-Borges & Helene, 2013; de Brito & Kurda, 2021) devendo ser avaliada

por estágios de tempo em que alguns fenômenos específicos e particulares ocorrem (Castro-Borges & Helene, 2013). Porém, estudos de durabilidade possuem custos expressivos, demandando tempos longos de análise, o que dificulta o desenvolvimento (Pauletti, 2004). Em suma, o projeto de durabilidade requer uma abordagem intrinsecamente holística, capaz de integrar as mudanças físico-químicas do CP, os fenômenos dependentes do tempo e as exigências de desempenho ao longo da vida útil, sob pena de que soluções de baixo carbono produzam benefícios aparentes, mas resultem em estruturas menos duráveis e maiores demandas de reabilitação no futuro.

Em resumo, nota-se que a demanda de redução das emissões de CO₂ associadas à produção do cimento, alcançada principalmente por meio da redução do teor de clínquer, tem afetado as características físico-químicas do material, gerando novos desafios, sobretudo no atendimento aos critérios de durabilidade das construções. Face à velocidade das ocorrências, os estudos de durabilidade não têm conseguido acompanhar o ritmo das mudanças. Além disso, como a durabilidade de materiais à base de cimento Portland comum (OPC) já é estudada desde o século passado, estudos neste campo do conhecimento geralmente não são considerados inovadores e dificilmente são aceitos para publicação, o que não motiva a realização de estudos nesse campo, havendo lacunas sobre os efeitos da descarbonização do cimento na durabilidade do concreto.

4. DA RESISTÊNCIA À DESCARBONIZAÇÃO

Desde o advento do cimento Portland, são aproximadamente 200 anos de história, em um período que coincide, conforme as figuras 1 e 2, com os grandes desenvolvimentos da humanidade e as emissões de GEE. Ao longo deste percurso, houve muitas mudanças, conforme o esboço apresentado na figura 7, atualizada de Possan (2010) para incluir as questões atuais. Nesta representação, observa-se que, nos estágios iniciais do desenvolvimento e da disseminação do concreto armado, os elementos e estruturas eram concebidos e projetados com base no bom senso e na experiência profissional. A principal característica controlada era a resistência à compressão, considerada por muito tempo um parâmetro confiável para as especificações de projeto. Há época, os valores de resistência à compressão variavam entre 10 e 20 MPa, com estruturas e elementos de elevada robustez. Acreditava-se que o concreto, produzido a partir do cimento Portland recém-descoberto por John Aspdin em 1824, comportava-se como rocha, com durabilidade para além do ciclo de vida humano.

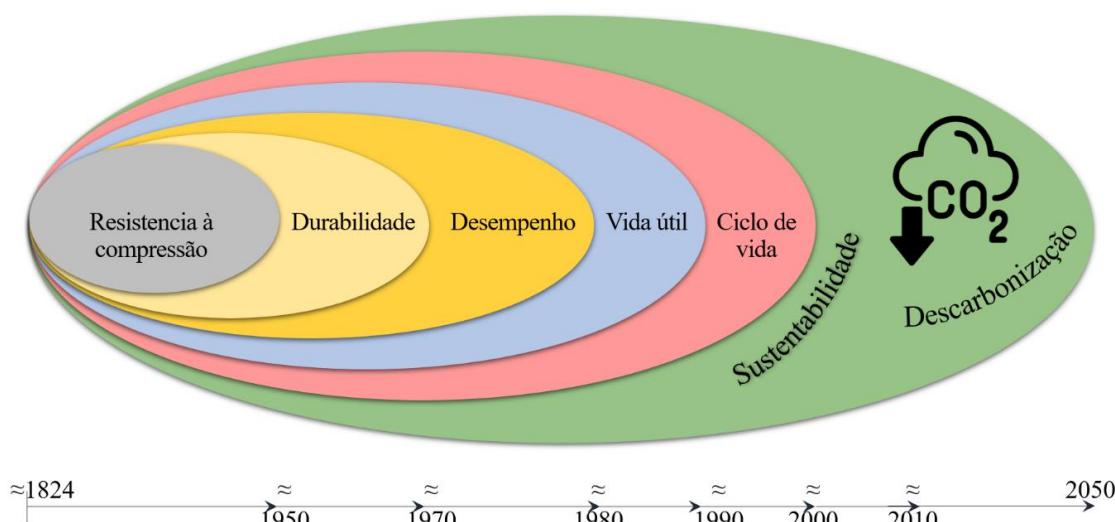


Figura 7. Evolução conceitual do concreto ao longo do tempo (atualização da figura proposta na tese de doutorado de (Possan, 2010; Possan et al., 2018).

Mas, com o passar do tempo e com o registro das primeiras intercorrências associadas ao comportamento não esperado do material, iniciaram-se os estudos de durabilidade, considerando o ambiente de exposição e o comportamento em uso, emergindo também o conceito de desempenho. Por volta dos anos 1950, a durabilidade foi entendida como a interação entre o material e o ambiente de exposição, constatando-se que agentes agressivos externos, como íons cloretos, dióxido de carbono (CO₂), podem degradar o material feito com CP. Em paralelo, começa a ser necessário indicar o "tempo" em que o concreto atenderia aos requisitos de projeto, considerando o uso (desempenho) e as ações do ambiente de exposição (durabilidade), o que levou, no final do século passado, aos estudos sobre vida útil determinística e probabilística. Ainda, na virada para o século XXI, fatores como a competitividade e a preservação ambiental têm impulsionado mudanças na forma como as estruturas devem ser concebidas, exigindo que sejam projetadas de forma holística, considerando o ciclo de vida das construções.

Inicialmente, a análise do ciclo de vida se concentrava em aspectos "do berço ao túmulo", mas, com o avanço da economia circular (EC), essa perspectiva passou a ser "do berço ao berço", buscando o reaproveitamento contínuo de recursos e materiais. Nesta crescente, o conceito de sustentabilidade das estruturas de concreto começa a ser debatido por diversos pesquisadores e organizações em todo o mundo, surgindo os primeiros documentos norteadores, majoritariamente teóricos, sobre a temática com destaque para o fib 53 (2010) e Fib 2020 (2024). Somente nos últimos 10 anos, o conceito de descarbonização ganha força no setor, sobretudo na indústria do cimento, emergindo como um indicador mensurável do alcance da sustentabilidade. Descarbonizar é reduzir a pegada de carbono e de energia de produtos e processos, um processo lento e gradual que pode ser impulsionado pelas novas tecnologias e é preponderante para a contenção do aquecimento global em curso.

De forma geral, o entendimento atual é que um concreto sustentável é um concreto durável (fib, 2024; Martinez et al., 2025; Possan et al., 2018). Estudos recentes (Gursel et al., 2023; Martinez et al., 2025) demonstram que estruturas mais longevas tanto pela durabilidade dos materiais empregados (Martinez et al., 2025) ou por mecanismos de reutilização das estruturas existentes no ambiente construído para novas aplicações (Gursel et al., 2023), são mais sustentáveis, ou seja, possuem menor potencial de aquecimento global. Um concreto mais durável pode reduzir significativamente as emissões de CO₂ associadas ao cimento. O concreto romano, face sua longevidade, oferece insights interessantes para o concreto moderno com vistas à construção de baixo carbono, como o uso de biomassa com fonte combustível (Martinez et al., 2025). Ao mesmo tempo que reduzem as emissões de carbono, tecnologias emergentes como a mineralização de CO₂ (Proença et al., 2024), materiais de base biológica e a impressão 3D prometem revolucionar os métodos de construção (Kumar et al., 2025). Inovações em materiais (Proença et al., 2024), métodos aprimorados de proporcionamento de materiais à base de cimento (Oliveira et al., 2025), emprego de tecnologias digitais como inteligência artificial (IA) (Felix et al., 2021) e a internet das coisas (IoT) (Barbhuiya et al., 2025) além de tecnologias para captura e uso de carbono (Aceituno et al., 2025; Emanuelsson et al., 2025; Yan & Zhang, 2019) são essenciais para a produção de concreto de baixo carbono (Barbhuiya et al., 2025). Soluções baseadas em biomimética como emprego de agentes biológicos para recuperação de fissuras em estruturas de concreto (De Rooij et al., 2013; Ghellere et al., 2025; Jonkers & Schlangen, 2007; S. Kumar et al., 2025; Lenz et al., 2023) apresentam potencial de emprego para a produção de estruturas resilientes e duráveis.

5. PERSPECTIVAS FUTURAS

A descarbonização da indústria cimenteira representa uma transição inevitável e estratégica para o cumprimento das metas globais de neutralidade de carbono até 2050. No entanto, este processo exige que o setor avance de uma lógica centrada na redução direta das emissões para uma

abordagem integrada, que também contemple os impactos no desempenho e na durabilidade das estruturas de concreto.

Entre as principais tendências observadas, destaca-se a substituição do clínquer por materiais cimentícios suplementares (MCS), como escórias, cinzas volantes, fíler calcário e argilas calcinadas. Embora tais substituições contribuam para a mitigação das emissões, impõem desafios técnicos relacionados à manutenção da reatividade e à garantia da vida útil das estruturas, demandando controle rigoroso da dosagem, da cura e da compatibilidade entre os constituintes.

Outra tendência consolidada é o aumento da finura e da reatividade dos cimentos, estratégia que visa compensar a redução do teor de clínquer, mas que pode elevar o calor de hidratação e favorecer o desenvolvimento de manifestações patológicas, como a formação retardada de etringita (DEF) e fissurações térmicas em idades iniciais.

No horizonte tecnológico, projeta-se o avanço das soluções de captura, utilização e armazenamento de carbono (CCUS), fundamentais para a obtenção de emissões líquidas zero a partir de 2030. No Brasil, políticas recentes, como a Lei nº 15.042/2024, sinalizam a entrada do país nesse mercado emergente, ainda em processo de consolidação internacional.

Perspectivas recentes também apontam para a integração entre a descarbonização e a durabilidade como um eixo estratégico. A literatura enfatiza que, sem considerar o desempenho de longo prazo, o setor corre o risco de deslocar o problema do cimento para o concreto, resultando em emissões indiretas associadas a manutenções frequentes ou reconstruções prematuras. Assim, torna-se imperativo incorporar critérios de durabilidade aos planos de mitigação do carbono, de modo a assegurar o benefício ambiental efetivo das soluções de baixo carbono.

Adicionalmente, observa-se o avanço de tecnologias emergentes, como a mineralização de CO₂, os materiais de base biológica, os cimentos com agentes autorregenerativos e a impressão 3D de concreto, que prometem redefinir as práticas construtivas e os paradigmas de sustentabilidade. Em paralelo, a adoção de princípios de economia circular e a extensão da vida útil das estruturas existentes constituem pilares fundamentais da transição para um ambiente construído mais resiliente e de menor impacto ambiental.

Como o cimento Portland é a principal matéria-prima na cadeia de materiais à base de cimento, suas características físico-químicas afetam todos os intervenientes; é necessário pensar de forma holística, considerando os processos de produção do cimento e do concreto em conjunto. Como os estudos de durabilidade são complexos e demandam longos períodos de análise, observa-se uma lacuna na literatura no que tange ao comportamento de durabilidade de concretos produzidos com cimentos descarbonizados.

Notadamente, ao longo das últimas décadas, os bens de consumo sofreram alterações para adequações de ordem técnica e econômica e, recentemente, tornaram-se necessárias novas mudanças de ordem ambiental. É o caso do cimento Portland, que em termos físico-químicos, o cimento Portland produzido em 2025 é ligeiramente diferente do produzido no início século XXI e ao produzido no século anterior. O material estar diferente não é um problema. A questão central é como empregá-lo de modo a manter o desempenho do concreto ao longo do tempo.

Em síntese, é necessário fazer mais com menos e passar de “o melhor cimento e concreto do mundo para o melhor cimento e concreto para o mundo”. A notável durabilidade do concreto romano pode servir de inspiração para isso.

6. CONCLUSÕES

A descarbonização do cimento Portland é um caminho necessário para atender às metas globais de mitigação climática, mas seus desdobramentos na durabilidade das estruturas de concreto não podem ser negligenciados. As alterações físico-químicas decorrentes da redução do teor de clínquer e do uso ampliado de MCS modificam o comportamento do cimento e impõem novos desafios de desempenho ao longo da vida útil. Nesse contexto, a sustentabilidade depende de uma abordagem

holística que integre produção, composição, comportamento mecânico e durabilidade, evitando soluções de baixo carbono que comprometam o desempenho em serviço. Avançar nesse equilíbrio exige pesquisa contínua, métodos de avaliação mais robustos e projetos que conciliem responsabilidade ambiental com longevidade estrutural.

7. AGRADECIMIENTOS

A autora agradece aos estudantes de graduação, mestrado e doutorado e pesquisadores do grupo de investigação CO₂ Construction que atuam na área de descarbonização e/ou durabilidade que por meio de discussões, análises críticas e troca de experiências permitiram que esse texto fosse possível. À Kathleen Risson e a Emerson Felix pela contribuição na revisão do texto.

8. REFERENCIAS

- Climateworks (2025). *Achieving a sustainable U.S. infrastructure bill: New pathways to decarbonizing cement and concrete* - ClimateWorks Foundation. Available in <https://www.climateworks.org/>. Acesso 05 setembro 2025.
- FIB Bulletin 53 (2010). *Model Code for Structural Concrete Textbook on behaviour, design and performance*, Second edition. Volume 3: Design of durable concrete structures. 2010, p.390.
- Bentz, D. P., Sant, G., Weiss, J. (2008). *Early-Age Properties of Cement-Based Materials: I. Influence of Cement Fineness*. Journal of Materials in Civil Engineering, [s. l.], v. 1561, n. 2, p. 17. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0899-1561\(2008\)20](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0899-1561(2008)20).
- ABNT. (2018). *NBR 16697: Portland cement - Requirements* (p. 12).
- Aceituno, D., Zhang, X., Hao, H. (2025). *A comprehensive review on carbon utilization pathways in concrete from conventional to improved strategies*. Carbon Capture Science & Technology, 16, 100467. <https://doi.org/10.1016/J.CCST.2025.100467>
- Adesina, A. (2020). *Recent advances in the concrete industry to reduce its carbon dioxide emissions*. Environmental Challenges, 1. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2020.100004>
- Adesina, A., Zhang, J. (2024). *Impact of concrete structures durability on its sustainability and climate resiliency*. Next Sustainability, 3 (December 2023), 100025. <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2024.100025>
- Alexander, M., Beushausen, H. (2019). *Durability, service life prediction, and modelling for reinforced concrete structures – review and critique*. Cement and Concrete Research, 122, 17–29. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2019.04.018>
- Andrade, J. J. O., Possan, E., Dal Molin, D. C. C. (2017). *Considerations about the service life prediction of reinforced concrete structures inserted in chloride environments*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2. <https://doi.org/10.1007/S41024-017-0025-X>
- Barbhuiya, S., Das, B. B., Adak, D., Kapoor, K., Tabish, M. (2025). *Low carbon concrete: advancements, challenges and future directions in sustainable construction*. Discover Concrete and Cement, 1(1). <https://doi.org/10.1007/s44416-025-00002-y>
- Brasil. (2024). *Lei 15.042 - Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SBCE)*. 1, 1–2.
- Castro-Borges, P., Helene, P. (2013). *A holistic conceptual approach to concrete service life: a split into different time- stages*. Revista Alconpat, 3(3), 228–287. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i3.324>
- Choi, Y. W., Khalifa, M., Eltahir, E. A. B. (2024). *Climate Change Impact on “Outdoor Days” Over the United States*. Geophysical Research Letters, 51(19), 1–10. <https://doi.org/10.1029/2024GL111607>
- Coffetti, D., Crotti, E., Gazzaniga, G., Carrara, M., Pastore, T., Coppola, L. (2022). *Pathways towards sustainable concrete*. Cement and Concrete Research, 154, 106718.

<https://doi.org/10.1016/J.CEMCONRES.2022.106718>

Damineli, B. L., Kemeid, F. M., Aguiar, P. S., John, V. M. (2010). *Measuring the eco-efficiency of cement use*. Cement and Concrete Composites, 32(8), 555–562. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009>

Dattani, S., Rodés-Guirao, L., Ritchie, H., Ortiz-Ospina, E., Roser, M. (2025). *Life Expectancy*. 2023. <https://ourworldindata.org/life-expectancy>

de Brito, J., Kurda, R. (2021). *The past and future of sustainable concrete: A critical review and new strategies on cement-based materials*. Journal of Cleaner Production, 281. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123558>

De Rooij, M., Van Tittelboom, K., Belie, N. de, Schlangen, E. (2013). *RILEM TC 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*. In Springer (Vol. 1).

Emanuelsson, A. H., Rootzén, J., Johnsson, F. (2025). *Deployment of carbon capture and storage in the cement industry – Is the European Union up to shape?*. International Journal of Greenhouse Gas Control, 146, 104442. <https://doi.org/10.1016/J.IJGGC.2025.104442>

Felix, E. F., Carrazedo, R., Possan, E. (2021). *Carbonation model for fly ash concrete based on artificial neural network: Development and parametric analysis*. Construction and Building Materials, 266, 121050. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121050>

Félix, E. F., Falcão, I. da S., dos Santos, L. G., Carrazedo, R., Possan, E. (2023). *A Monte Carlo-Based Approach to Assess the Reinforcement Depassivation Probability of RC Structures: Simulation and Analysis*. Buildings, 13(4). <https://doi.org/10.3390/buildings13040993>

fib. (2024). *Model Code for Structural Concrete* (2020). In International Federation for Structural Concrete (fib). fédération internationale du béton / International Federation for Structural Concrete (fib).

Funahashi Jr, E. I., Possan, E., Hasparyk, N. P. (2024). *Influência do calor de hidratação de cimentos com escória de alto forno no risco de formação da etringita tardia (DEF)*. Ibracon, 1, 1–16.

Ghellere, P., Lenz, S. K., Passarini, M. R. Z., Possan, E. (2025). *Evaluation of different biological agents and application methods on the cracks self-healing in cement-based matrices*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 10(2). <https://doi.org/10.1007/s41024-025-00594-9>

Goulart, R. G. (2023). *Ecoeficiência de concretos com agregados graúdos reciclados de construção e demolição* (Vol. 1) [Dissertation]. Universidade Federal da Integração Latino-Americana.

Gursel, A. P., Shehabi, A., Horvath, A. (2023). What are the energy and greenhouse gas benefits of repurposing non-residential buildings into apartments? *Resources, Conservation and Recycling*, 198, 107143. <https://doi.org/10.1016/J.RESCONREC.2023.107143>

Habert, G., Miller, S. A., John, V. M., Provis, J. L., Favier, A., Horvath, A., Scrivener, K. L. (2020). *Environmental impacts and decarbonization strategies in the cement and concrete industries*. Nature Reviews Earth and Environment, 1(11), 559–573. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0093-3>

Habert, G., Roussel, N. (2009). *Study of two concrete mix-design strategies to reach carbon mitigation objectives*. Cement and Concrete Composites, 31(6), 397–402. <https://doi.org/10.1016/J.CEMCONCOMP.2009.04.001>

Hansen, J. E., Sato, M., Simons, L., Nazarenko, L. S., Sangha, I., Kharecha, P., Zachos, J. C., von Schuckmann, K., Loeb, N. G., Osman, M. B., Jin, Q., Tselioudis, G., Jeong, E., Lacis, A., Ruedy, R., Russell, G., Cao, J., Li, J. (2023). *Global warming in the pipeline*. Oxford Open Climate Change, 3(1). <https://doi.org/10.1093/oxfclm/kgad008>

Harari, Y. N. (2020). *Sapiens: a brief history of Humankind*. Companhia das Letras.

Harari, Y. N. (2024). *Nexus: a brief history of information networks from the stone age to AI* (Dom, Ed.). Random House.

Hasparyk, N. P., Kuperman, S. C., Funahashi Jr, E. I., Vicente, G. R., Gambale, E. de A. (2023).

- Recomendações Técnicas para a prevenção da DEF e da fússuração térmica no concreto.* In Educacao e Sociedade (Vol. 1, Issue 1).
- http://www.biblioteca.pucminas.br/teses/Educacao_PereiraAS_1.pdf http://www.anpocs.org.br/portal/publicacoes/rbcs_00_11/rbcs11_01.htm http://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/7845/1/td_2306.pdf [https://doi.org/10.1007/978-94-011-2280-1_3](https://direitoufma2010.files.wordpress.com/2010/IEA/CSI. (2009). Cement Technology Roadmap: Carbon Emissions Reductions up to 2050.</p>
<p>IPPC. Intergovernmental Panel on Climate Change. (1992). <i>Climate change: The IPCC 1990 and 1992 assessments.</i> In The World Environment 1972–1992. <a href=)
- Jonkers, H. M., Schlangen, E. (2007). *Self-healing of cracked concrete: A bacterial approach.* Proceedings of the 6th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures, 3, 1821–1826.
- Juenger, M. C. G., Snellings, R., Bernal, S. A. (2019). *Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights.* Cement and Concrete Research, 122(February 2019), 257–273. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.05.008>
- Koutroulis, A. G. (2019). *Dryland changes under different levels of global warming.* Science of the Total Environment, 655, 482–511. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.11.215>
- Kumar, R. (2020). *Dynamic Dalmia: Can They Do it Again?.* 1–10. <https://doi.org/10.1177/2516604220928787>
- Kumar, S., Gangotra, A., Barnard, M. (2025). *Towards a Net Zero Cement: Strategic Policies and Systems Thinking for a Low-Carbon Future.* Current Sustainable/Renewable Energy Reports, 12(1), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40518-025-00253-0>
- Lenz, S. K., Possan, E., Passarini, M. R. Z., Ghellere, P. (2023). *Influence of different bacterial strains on cracks self - healing in cement - based matrices with and without incorporated air.* Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 3. <https://doi.org/10.1007/s41024-023-00312-3>
- Martinez, D. M., Miller, S. A., Monteiro, P. J. M. (2025). *How sustainable was ancient Roman concrete?* IScience, 28(8), 113052. <https://doi.org/10.1016/J.ISCI.2025.113052>
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014). *Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.* McGraw-Hill Education.
- NASA. (n.d.). *Carbon Dioxide.* 2025. Retrieved August 25, 2025, from <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/?intent=121>
- Nehdi, M. L., Marani, A., Zhang, L. (2024). *Is net-zero feasible: Systematic review of cement and concrete decarbonization technologies.* Renewable and Sustainable Energy Reviews, 191, 114169. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2023.114169>
- NOAA, N. O. and A. A. (2025). *Global Monitoring Laboratory.*
- NOAA/ESRL, 2022. (2025). *Trends in Atmospheric Carbon Dioxide.* Earth System Research Laboratories. Global Monitoring Laboratory. In Earth System Research Laboratories. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/>
- OECD. (2024). *How's Life? 2024: Well-being and Resilience in Times of Crisis.* <https://doi.org/https://doi.org/10.1787/90ba854a-en>
- Oliveira, D. R. B., Leite, G., Possan, E., Marques Filho, J. (2023). *Concrete powder waste as a substitution for Portland cement for environment-friendly cement production.* Construction and Building Materials, 397(July), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132382>
- Oliveira, D. R. B., Proença, M. P., Risson, K. D. B. de S., Neves Junior, A., Marques Filho, J., Possan, E. (2025). *Optimized cementitious matrices with activated CDW fines: A sustainable path to low carbon cement.* Construction and Building Materials, 483, 141719. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2025.141719>
- Olivier, J. G. J., Paters, J. A. H. W. (2020). *Trends in global CO2 and total greenhouse gas 2020 report (Issue December).* <https://www.pbl.nl/en/publications/trends-in-global-co2-and-total-greenhouse-gas-emissions-2020-report>

- Olsson, J. A., Miller, S. A., Alexander, M. G. (2023). *Near-term pathways for decarbonizing global concrete production*. Nature Communications, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-40302-0>
- Pauletti, C. (2004). *Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação*.
- Population Matters. (2025). *population matters*. 2025. <https://populationmatters.org/>
- Possan, E. (2010). *Modelagem da Carbonatação e Previsão de Vida Útil de Estruturas de Concreto em Ambiente Urbano* [Tesis]. UFRGS.
- Possan, E. (2019). *Captura de CO₂ em materiais cimentícios*. 72–78.
- Possan, E., Dal Molin, D. C. C., Andrade, J. J. O. (2018). *A conceptual framework for service life prediction of reinforced concrete structures*. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 3(1). <https://doi.org/10.1007/s41024-018-0031-7>
- Proença, M. P., Oliveira, D. R. B., de Souza Risson, K. D. B., Possan, E. (2024). *CDW Powder Activated by Mechanical, Thermal and Tannic Acid Treatment: An Option for Circularity in Construction*. Waste and Biomass Valorization, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s12649-024-02802-y>
- Rissman, J., Bataille, C., Masanet, E., Aden, N., Morrow, W. R., Zhou, N., Elliott, N., Dell, R., Heeren, N., Huckestein, B., Cresko, J., Miller, S. A., Roy, J., Fennell, P., Cremmins, B., Koch Blank, T., Hone, D., Williams, E. D., de la Rue du Can, S., ... Helseth, J. (2020). *Technologies and policies to decarbonize global industry: Review and assessment of mitigation drivers through 2070*. Applied Energy, 266, 114848. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2020.114848>
- Ritchie, H., & Roser, M. (2025). *CO₂ emissions*. 2020. <https://ourworldindata.org/co2-emissions>
- ROADMAP BRASIL. (2019a). *Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*. SNIC 2019.
- ROADMAP BRASIL. (2019b). *Roadmap Tecnológico do Cimento: Potencial de redução das emissões de carbono da indústria do cimento brasileira até 2050*. SNIC 2019.
- Scrivener, K. L., John, V. M., Gartner, E. M. (2018). *Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry*. Cement and Concrete Research, 114, 2–26. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.03.015>
- Shah, I. H., Miller, S. A., Jiang, D., Myers, R. J. (2022). *Cement substitution with secondary materials can reduce annual global CO₂ emissions by up to 1.3 gigatons*. Nature Communications, 13(1). <https://doi.org/10.1038/S41467-022-33289-7>
- Simoneto, G. W. (2024). *Diagnóstico temporal das alterações físico-química do cimento Portland brasileiro e do uso de cimento ensacado para produção de concreto in situ* (Vol. 4, Issue 1) [Dissertation]. Universidade Federal da Integração Latino-Americana.
- Suleyman, M., Bhaskar, M. (2023). *A próxima onda*. In RECORD (Vol. 1, Issue 1).
- United Nations. (2017). *World Population Prospects: The 2017 Revision, Key Findings and Advance Tables*. In Department of Economic and Social Affairs, Population Division (Vol. 11, Issue 1).
- WBCSD. (2018a). *Technology roadmap for cement - World Business Council for Sustainable Development*. In International Energy Agency. <https://www.wbcsd.org/resources/technology-roadmap-low-carbon-transition-in-the-cement-industry/>
- WBCSD. (2018b). *World Business Council for Sustainable Development. Technology roadmap for cement*. In International Energy Agency.
- Yan, J., Zhang, Z. (2019). *Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS)*. Applied Energy, 235, 1289–1299. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.019>